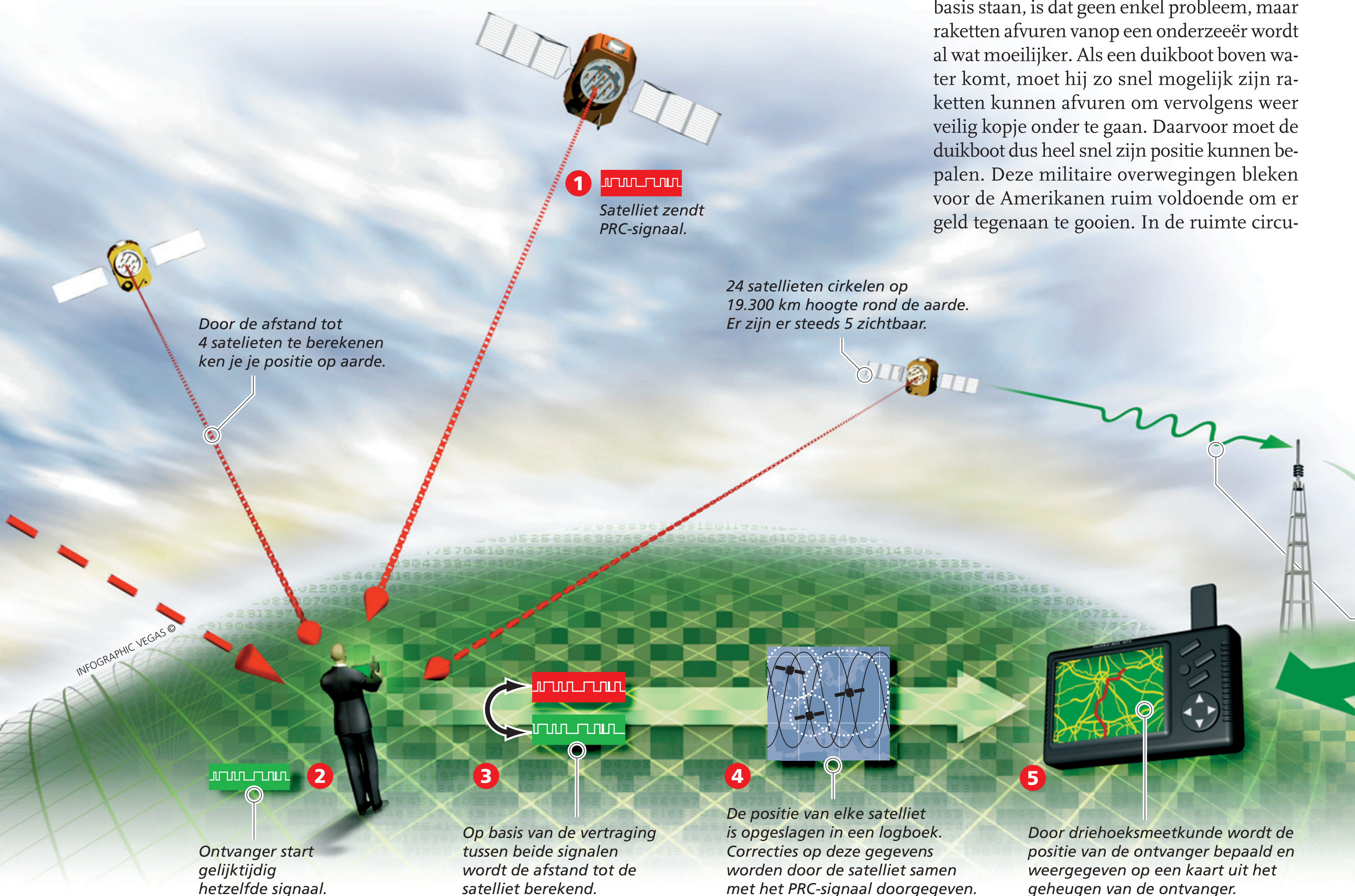
Wat doet GPS?

Waar ben ik?

Ooit oriënteerden alle zeelui zich aan de hand van de sterren. Dat gebeurt nog steeds, maar vandaag wordt daarvoor een GPS-ontvanger gebruikt. Een GPS? Je weet wel, zo'n apparaatje dat je exacte positie op aarde weergeeft. In deze aflevering leggen we je uit hoe dat toestel weet waar jij bent.

Wie ooit de film 'The Blair Witch Project' gezien heeft, zal wel twee keer nadenken vooraleer hij zonder kaart en kompas in de bossen gaat lopen. Hadden die studenten maar een GPS-systeem meegenomen, dan waren ze wellicht nooit verdwaald. Het basisprincipe van GPS (Global Positioning System) is vrij eenvoudig, maar er zit heel wat technisch vernuft achter. De geboorte van GPS is te danken aan het DoD (Department of Defense), het Amerikaanse ministerie van Defensie [**www.defenselink.mil**]. Zoals zo dikwijls werd de technologie ontwikkeld voor militaire doeleinden. Tijdens een oorlog wil je vanzelfsprekend je raketten zo precies mogelijk kunnen richten. Je wil immers vermijden dat te veel olie in vlammen opgaat. Om precies te kunnen 'mikken' moet je de positie van je doel kennen, én de plaats waar je lanceringsplatform opgesteld is. Wanneer je raketten ergens op een vaste basis staan, is dat geen enkel probleem, maar raketten afvuren vanop een onderzeeër wordt al wat moeilijker. Als een duikboot boven water komt, moet hij zo snel mogelijk zijn raketten kunnen afvuren om vervolgens weer veilig kopje onder te gaan. Daarvoor moet de duikboot dus heel snel zijn positie kunnen bepalen. Deze militaire overwegingen bleken voor de Amerikanen ruim voldoende om er geld tegenaan te gooien. In de ruimte circu-



leren permanent 24 GPS-satellieten [**www.trimble.com/gps/satellites.html**]. Er zijn nog vier satellieten in 'reserve'. Die worden gelanceerd als er eentje van de 24 in panne valt. Elke satelliet maakt dagelijks op een hoogte van ongeveer 19.300 km twee baantjes om de aarde. De omloopbanen van die satellieten zijn zo uitgekiend dat je op elk moment op elke plek op aarde minstens vijf satellieten kan zien. Je GPS-ontvanger weet precies hoe ver elke satelliet van je verwijderd is. En dat – in combinatie met een beetje driehoeksmeetkunde – is precies de informatie die nodig is om je positie te bepalen.

Drie bedoeïenen

Stel dat jij je in het midden van een gigantische woestijn bevindt. Je hebt weliswaar een kaart van de woestijn, maar je weet totaal niet waar je bent. Een vriendelijke voorbijganger vertelt je dat jij je op 50 km van oase Siwa bevindt. Je weet waar die oase ligt, dus je kan op de kaart een cirkel met een straal van 50 km rondom oase Siwa trekken. Je weet met zekerheid dat jij je ergens op die cirkel bevindt. Een tweede voorbijganger vertelt je dat je op 30 km van Oase Wadi bent. Je weet waar oase Wadi is, en kan dus een tweede cirkel tekenen. Die cirkel kruist de eerste cirkel op precies twee punten. Op één van die twee punten sta jij. Even later passeert een derde persoon die je vertelt dat je op 20 km van oase Kiwi bent. Je kan nu een derde cirkel tekenen. De drie cirkels zullen elkaar nu op precies één punt kruisen. Dat is het punt waar jij je bevindt. Als je die voorbijgangers nu vervangt door satellieten, begrijp je het basisprincipe van GPS. Er is wel één verschil. Ons voorbeeld gaat uit van positionering in een vlakte. Een vlakte is een tweedimensionale wereld. GPS werkt echter in de (driedimensionale) ruimte. We moeten de cirkels dus vervangen door bollen, en om onze positie te bepalen hebben we niet drie maar vier waarnemingen nodig. De praktijk leert ons dat dit vierde referentiepunt niet strikt noodzakelijk is. Na het kruisen van de drie bollen zal slechts één van de twee mogelijke punten op het aardoppervlak liggen. Het andere punt bevindt zich niet op een positie waar jij je realistischerwijze kán bevinden. Doorgaans wordt echter wel een vierde referentiepunt in rekening gebracht, om nauwkeuriger te zijn én om de hoogte te berekenen. Om je te kunnen vertellen waar je bent, moet de GPS-ontvanger dus weten waar de satellieten zich bevinden en wat de afstand tussen jou en de satellieten is. Alle GPS-satellieten zenden radiogolven uit. Die golven worden door je GPS-ontvanger ontvangen. Radiosignalen reizen aan de snelheid van het licht (300.000 km/s). Als de GPS-ontvanger nu uitdoktert hoe lang het signaal onderweg was, dan kan de afstand tussen je ontvanger en de satelliet berekend worden.

Op een schoteltje

Hoe wordt dat nu gedaan? Op een bepaald moment begint de satelliet een signaal uit te zenden. Dat signaal noemen we de Pseudo Random Code (PRC). De PRC is een erg complexe reeks van eentjes en nullen. Op precies hetzelfde moment start je ontvanger met het doorlopen van hetzelfde patroon. Wanneer de ontvanger het signaal (uitgezonden door de satelliet) ontvangt, zal dat signaal een heel klein beetje achterlopen op hetzelfde signaal dat de ontvanger afspeelt. Op basis van deze vertraging kan de afstand berekend worden. De tijd wordt dan simpelweg vermenigvuldigd met de snelheid van het licht. Het PRC-signaal is bewust heel erg ingewikkeld gemaakt. Zo vermijdt men dat de ontvanger per ongeluk synchroniseert met een andere signaal. Elke satelliet zendt een eigen PRC uit. De ontvanger kan dus ook niet per ongeluk het signaal van een verkeerde satelliet opvangen. Dat heeft als voordeel dat alle satellieten zonder problemen hetzelfde kanaal kunnen gebruiken én het systeem is veel moeilijker te kraken. Een ander – cruciaal – voordeel aan het gebruik van PRC is dat het signaal door middel van algoritmes 'versterkt' kan worden. Daarom heeft je GPS ook geen grote satellietschotel nodig om de signalen te kunnen ontvangen.

De juiste tijd

Essentieel bij deze techniek is dat de ontvanger en de satelliet op **precies** hetzelfde moment beginnen met het uitzenden van een bepaald signaal. Een fout van één honderdste seconde betekent een onnauwkeurigheid van maar liefst 3.000 km! De klok in de satelliet loopt correct, want die wordt gecorrigeerd aan de hand van een atoomklok [**http://science.howstuffworks.com/atomic-clock.htm**]. De ontvanger kunnen we echter niet uitrusten met een atoomklok, want die kost minstens € 50.000. Dat zou de commerciële slaagkansen van GPS aanzienlijk verminderen. Om dit probleempje te omzeilen werd een trucje in het leven geroepen. Die truc is tevens essentieel voor de goede werking van GPS. Elke ontvanger heeft een relatief eenvoudig kwartshorloge aan boord. Dat kwartshorloge wordt – indien nodig – gecorrigeerd om perfect synchroon te lopen met de atoomklok van de satelliet. Die correcties gebeuren op basis van vier satellieten (in drie dimensies). We keren terug naar ons voorbeeld van de woestijn. Stel dat we ons – gemeten in lichtsnelheid – op respectievelijk vijf, drie en twee seconden van de oases Siwa, Wadi en Kiwi bevinden. Stel verder ook dat de klok van onze ontvanger één seconde achterloopt op de atoomklok. Het resultaat is dat onze ontvanger denkt dat we ons op zes, vier en drie seconden afstand van de drie oases bevinden. Echter, er is geen enkele plek in de woestijn die aan die voorwaarden voldoet. Met andere woorden: na het uittekenen van de drie cirkels op de kaart merken we dat er geen gemeenschappelijk snijpunt is. De GPS-ontvanger merkt dit op, want hij is geprogrammeerd om op zoek te gaan naar dat snijpunt. De straal van de cirkel is in dit geval de afstand die je kan afleggen in respectievelijk zes, vier en drie seconden. Om dit op te lossen, zal de ontvanger stelselmatig zijn klok vooruitzetten en opnieuw op zoek gaan naar dat snijpunt. Wanneer het snijpunt gevonden is, loopt het kwartshorloge van de ontvanger synchroon met de atoomklok uit de satelliet. Dit proces wordt voortdurend herhaald en heeft als gevolg dat zelfs een heel eenvoudig kwartshorloge plotsklaps een perfecte atoomklok wordt!



Met dit handige toestelletje raak je nooit meer de weg kwijt...

Foutjes en afstanden

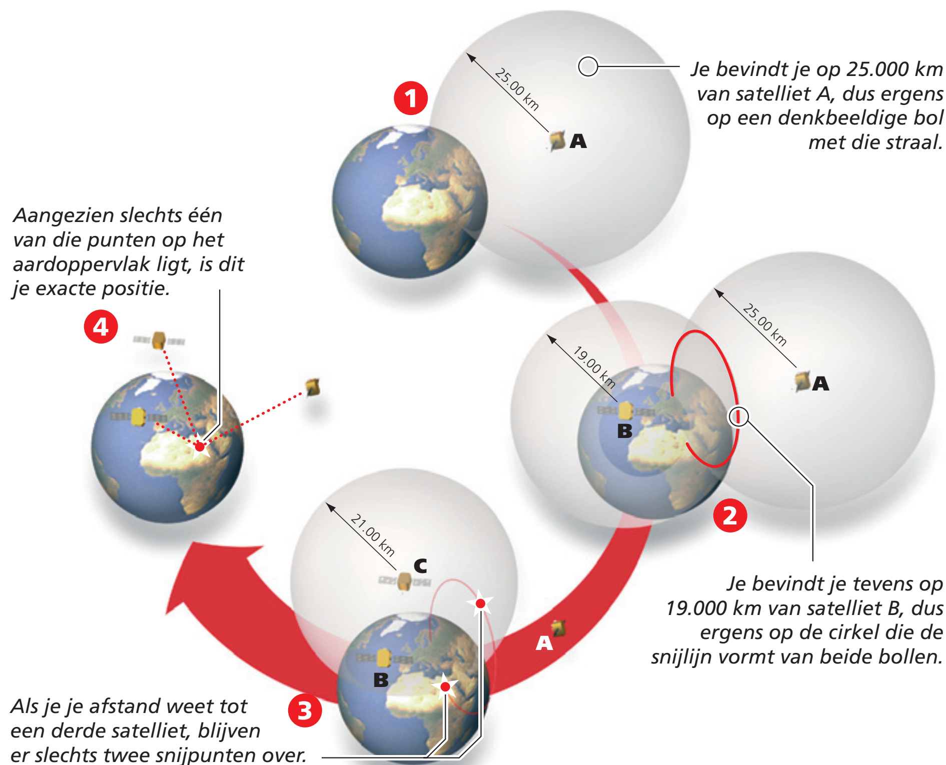
Als gevolg hiervan kunnen we exact de afstand tot de satelliet berekenen. Die kunnen we immers afleiden uit de tijd die het PRC-signaal nodig heeft om de afstand tussen satelliet en ontvanger te overbruggen. Ons voorbeeld bracht wederom slechts drie waarnemingen

DIFFERENTIAAL GPS

A *Bij differentiaal GPS berekent een vaste ontvanger op aarde zijn afstand tot de satelliet. Dat gebeurt op basis van de positie van de vaste ontvanger.*

B *Die berekening wordt vergeleken met de effectieve afstand tot de satelliet.*

C *De correctiefactor wordt doorgestuurd aan alle dGPS-ontvangers (roving receivers) in de buurt.*



en twee dimensies in rekening, maar in de ruimte (drie dimensies) volstaat het om één extra waarneming in rekening te brengen. Nu we precies weten wat de afstand tot de vier satellieten is, moeten we enkel nog de positie van de satellieten zelf uitvissen. Daar was men bij het DoD echter op voorzien. De omloopbanen van alle 24 satellieten verlopen immers volgens een vastgelegd patroon. Die routes zijn geregistreerd in een soort logboek en elke ontvanger heeft dat logboek in zijn geheugen zitten. Je zou denken dat dit voldoende is. Spijtig genoeg is er ook nog zoiets als de aantrekkingskracht. Niet tussen twee mensen, maar wel de krachten die de zon en de maan uitoefenen op die satellieten. Dat is niet veel, maar voldoende om de baan van de satellieten heel subtiel te beïnvloeden. Het logboek dat in de ontvanger zit, is dus niet helemaal correct. Om dat op te vangen worden de banen van alle satellieten voortdurend in het oog gehouden. Elke wijziging, hoe miniem ook, wordt doorgegeven aan de satelliet zelf. De satelliet zal deze correcties vervolgens samen met het PRC naar de GPS-ontvanger versturen. Die past vervolgens zijn gegevens aan. Spijtig genoeg is dit nog steeds niet goed genoeg om ons precies te vertellen waar we ons bevinden. Immers, we zijn er tot nu toe steeds vanuit gegaan dat we ons in een vacuüm bevinden. Ofwel: dat de snelheid van het licht overal en altijd hetzelfde is. Dat is echter niet zo. De satellieten bevinden zich erg hoog boven de aarde, de signalen moeten niet enkel doorheen de troposfeer, maar ook door de ionosfeer. Dat tast de lichtsnelheid aan. Die hangt immers af van de materie waar het licht doorheen gaat. Wanneer het GPS-signaal het aardoppervlak bereikt, kan het ook nog eens gehinderd worden door wolkenkrabbers of andere grote gebouwen vooraleer het uiteindelijk onze ontvanger bereikt. Dat noemen we een multipath error. Het afgeketste signaal kan de ontvanger in verwarring brengen. Tot slot zijn ook minuscule foutjes in de atoomklok en in de baan van de satelliet onvermijdbaar.

Nog juister

Een oplossing voor dit probleem is differentiaal GPS (dGPS). Een vast punt waarvan de positie exact bekend is, gaat fungeren als correctiefactor. Even terzijde: wie spreekt over differentialen denkt automatisch aan wiskunde. Wie niet onmiddellijk rillingen krijgt, kan misschien eens kijken op de volgende pagina van de VUB [**www.vub.ac.be/DWIS/DWIShome/waarom.html**]. dGPS gaat uit van de veronderstelling dat twee GPS-ontvangers die relatief dicht bij elkaar staan, vrijwel dezelfde fouten zullen bevatten. Ze moeten immers doorheen hetzelfde 'stukje' van de atmosfeer. Centraal bij dGPS is een vaste ontvanger op aarde. Dat is ons referentiepunt. Van die ontvanger kennen we de exacte positie. Een tweede ontvanger noemen we de 'roving' of zwevende ontvanger. Die gebruiken we gewoon om onze positie te bepalen. Die roving receiver moet zich wel in de directe omgeving van de vaste ontvanger bevinden. Met 'directe omgeving' bedoelen we hier in een straal van enkele honderden kilometers. Als we vervolgens de GPS-coördinaten voor die positie berekenen, is het verschil tussen die berekening en de gekende positie de correctiefactor. Speciaal aan die ontvanger op aarde is dat hij vertrekt vanuit zijn geografische positie om van daaruit te berekenen hoe lang de GPS-signalen naar de satelliet onderweg zouden moeten zijn. Die meting wordt vergeleken met de effectieve reistijd zoals gemeten door de GPS-ontvanger waarmee wij onze positie bepalen. Die correctiefactor wordt vervolgens toegepast op de roving receiver, die zijn data vervolgens kan aanpassen. Hierbij willen we alleen nog vermelden dat het basisstation onmogelijk kan weten welke satelliet de roving receiver gebruikt om zijn positie te bepalen. Daarom zal het basisstation de afwijkingen voor alle zichtbare satellieten berekenen en al die gegevens doorgeven aan de roving receiver. De roving receiver past vervolgens de voor hem relevante gegevens toe op zijn berekeningen om tot een meer precieze positie te komen. Dat leidt tot metingen die stukken nauwkeuriger zijn dan standaard GPS. Daar waar GPS nog een afwijking tot 100 meter kan hebben, is dat bij dGPS in het slechtste geval vijf meter. dGPS kan alle fouten, uitgezonderd multipath errors want die komen voor in de directe omgeving van de ontvanger, en eventuele fouten eigen aan de ontvanger zelf, elimineren.

Wil je nu wel eens aan den lijve ondervinden hoe GPS werkt, dan kan je een kijkje nemen op [**www.formar.be**], de Belgische importeur van Garmin GPS-toestellen [**www. garmin.com**]. Ze verkopen zelf geen toestellen, maar je vindt er wel een lijstje terug van alle winkels die de GPS-apparaten in de rekken liggen hebben. En kom niet meer vertellen dat je de weg kwijt was!

— Benjamin Carlier —

TYPISCHE AFWIJKING IN METER (PER SATELLIET)	STANDAARD GPS	DIFFERENTIAAL GPS
Atoomklok	1.5	0
Omloopbaan van de satelliet	2.5	0
Ionosfeer	5.0	0.4
Troposfeer	0.5	0.2
Ruis/Storing eigen aan de ontvanger	0.3	0.3
Multipath error	0.6	0.6